干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

伊朗高原和北非感热异常对夏季塔里木盆地降水的影响

陈佳毅， 赵 勇

（高原大气与环境四川省重点实验室/成都信息工程大学大气科学学院，成都 四川 610225）

摘 要： 基于1971—2019年日本气象厅提供的JRA-55地表感热、大气环流再分析数据和国家气象信息中心提供的我国陆面逐月格点降水数据，研究了夏季伊朗高原和北非感热异常对同期塔里木盆地降水的可能影响。结果表明：(1) 夏季伊朗高原感热和北非感热均与塔里木盆地夏季降水密切联系，将2个区域加热共同考虑，其与塔里木盆地降水的关系要比仅考虑单一区域加热更为紧密。(2) 当伊朗高原感热整体偏强，且北非感热呈北弱南强异常分布时，对应中亚副热带西风急流相对偏南，中亚和蒙古高原上空分别为异常气旋和反气旋控制，塔里木盆地上空南风加强；热带印度洋水汽在阿拉伯海与中亚的异常环流配合下北上进入塔里木盆地；以上条件共同导致了同期塔里木盆地降水的增多，反之亦然。(3) 北非和伊朗高原加热均可单独影响塔里木盆地夏季降水，其中伊朗高原感热对大尺度环流和水汽输送的影响均显著，因此其与降水的关系也更加密切。北非感热加热的影响主要体现在大尺度环流方面，对水汽输送的影响和伊朗高原存在差异，主要体现在印度半岛上空的异常反气旋位置偏南，导致阿拉伯海水汽无法进入塔里木盆地。

关 键 词： 感热异常；共同加热；北非；伊朗高原；塔里木盆地夏季降水

文章编号：

下垫面加热是大气环流演变的驱动因子之一，对区域天气气候存在重要影响，许多气象学家从下垫面加热角度分析了地表热力状况对中国夏季降水的影响[1-3]。海洋作为最广阔的下垫面，可以存储大量的水汽及能量，其表面热力状况的变化对我国乃至整个北半球环流及降水有着重要影响[4-6]。热带印度洋海温的异常增暖能够增强阿拉伯海水汽向北传输，有利于西北夏季降水的发生[7-8]。虽然海洋热状况对我国夏季降水有着重要影响，但陆面的热力强迫也不可忽视。如青藏高原作为欧亚大陆陆面过程中热力效应最显著的区域，其热源变化对于中国夏季的旱涝分布具有较好的指示意义[9-10]。

目前对地表热力效应的研究多关注青藏高原，也有研究分析了伊朗高原和北非地区热力强迫与中国夏季降水的联系。伊朗高原的感热加热会在对流层中低层激发出异常的气旋式环流，加强南亚水汽向内陆输送，这对东亚地区的季风降水起到重要维持作用[11-12]。伊朗高原感热异常显著影响着我国西北尤其是新疆的夏季降水，其感热异常能够激发出向下游传播的大气长波，进而对下游天气产生影响[13-14]。西风环流携带的大西洋及欧亚大陆的蒸散水汽影响着西北大部分地区的降水分布，伊朗高原的热力效应在水汽输送过程中扮演着重要角色[15]。春季伊朗高原的热力强迫可以通过影响南亚高压南北位移，调节我国东部降水分布[16]。北非地区的春季感热异常能够在西风带中强迫出纬向环流波列并向东传播，对中国东部的夏季降水存在着滞后影响[17]。北非地区与青藏高原西北部的感热表现出显著的负相关关系，前者主要影响华北和江淮地区降水，而后者则主要影响华北和华南降水[18-19]。夏季印度洋西北部和北非中部的下垫面偏冷时，秋季中亚北部低压槽加深、西太平洋副高偏强，形成了淮北秋季连阴雨发生的有利环流形势和水汽条件[20]。赵勇等[21]从海陆热力差异的角度研究了北

收稿日期： 2021-11-15； **修订日期：** 2022-03-11

基金项目： 国家自然科学基金(41875102)；四川省科技计划项目(2020JDJQ0050)资助

作者简介： 陈佳毅(1995-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区气候变化研究. E-mail: 825178164@qq.com

通讯作者： 赵勇(1979-)，男，博士，研究员，主要从事干旱区气候变化和模拟研究. E-mail: zhaoy608@cuit.edu.cn

非地区海陆温差与江淮地区夏季降水的关系，前冬北非大陆陆地偏冷而其西北侧海温偏暖，将导致次年夏季江淮流域降水的增加。

在全球变暖的背景下，我国的半干旱地区范围持续扩张，干旱与半干旱地区气候变化显著[22-23]。自1987年以来，西北干旱区气候由暖干向暖湿型转变，塔里木盆地夏季降水增加显著[24-25]。许多气象专家针对夏季新疆地区降水异常变化的原因进行过多方面的研究[26-27]，也有学者从陆面热力强迫的角度探讨了伊朗高原和北非与新疆夏季降水的联系。春季伊朗高原感热的异常增强，有利于新疆北部地区的降水增多[28]。伊朗高原的感热强迫显著影响着中亚低涡等大尺度环流系统，而这些环流系统也是新疆夏季降水发生的关键因子[29]。北非地区的陆面加热可以影响北非高压的发展，其与新疆夏季降水异常存在一定联系[30]。综上可见，北非和伊朗高原地表感热均与新疆夏季降水存在联系，但从区域协同的角度将伊朗高原和北非地区一并考虑，分析其影响新疆夏季降水的研究还较少。本文首先给出伊朗高原和北非感热异常与塔里木盆地降水的关系，然后通过分析2个区域加热对大尺度环流和水汽输送的影响，研究二者对塔里木盆地夏季降水的影响过程，加深对干旱区气候变化机制的理解。

1 研究区概况

塔里木盆地地处中国新疆南部，三面高山环绕，南侧受青藏高原阻隔，来自热带海洋的水汽难以达到，盆地内部沙漠与绿洲共同构成了独特而脆弱的生态环境，是气候变化的敏感区域[31]。这样特殊的地理条件，使该地区水汽条件差，对自然降水的依赖性大，是中国同纬度降水最少的地区[32]。塔里木盆地常年干旱少雨，降水主要集中在夏季，从1971—2019年新疆夏季降水趋势变化分布（图1）可以看出，近50 a来新疆夏季降水表现出增加趋势，其中伊犁河谷，天山山区以及塔里木盆地西部3个地区降水增加尤其显著。

2 数据与方法

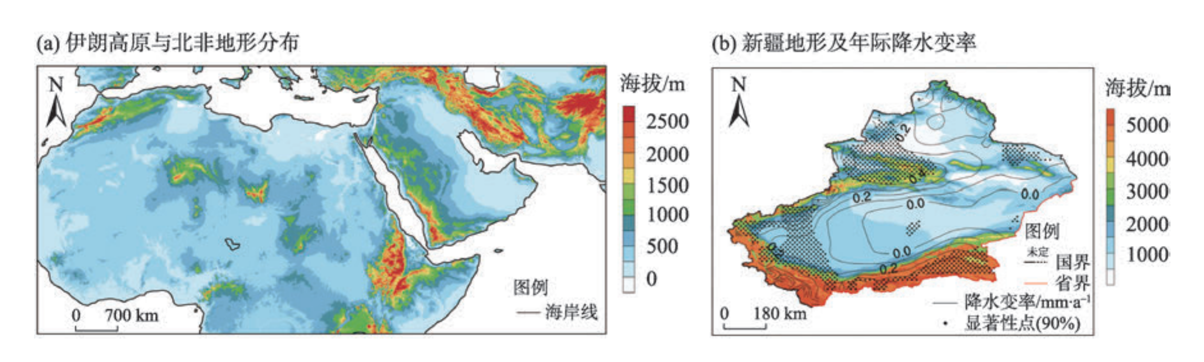
2.1 数据来源

由于北非和伊朗高原地区气象观测数据较为匮乏，因此多使用再分析资料，已有研究对多套再分析资料比较后得出，JRA-55再分析资料可以如实反映伊朗高原地表感热的时空变化特征，可信度较高[33-34]，因此，本文选用JRA-55资料的月平均地表感热（https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/jra-55）。同时为了分析感热异常对环流形势及水汽输送的影响，还选取了JRA-55的月均等压面风场、相对湿度和地表气压场等数据，水平分辨率为1.25°×1.25°[35]。塔里木盆地逐月降水数据由国家气象信息中心提供[36]，其水平分辨率为0.5°×0.5°。本文夏季指7—8月的气候平均态，资料长度为1971—2019年共49 a。

2.2 研究方法

本文采用的主要方法有：奇异值分解（Singular value decomposition，SVD）分析、多元线性回归分析、线性相关及偏相关分析[37-38]。

（1）奇异值分解分析：为了分析伊朗高原和北非地区感热与塔里木盆地夏季降水的联系，分别以伊朗高原和北非地区标准化地表感热作为左场



注：图b基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS（2019）1698号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 伊朗高原与北非地形及新疆夏季降水变率空间分布

Fig. 1 Topography of Iranian Plateau and North Africa, and spatial distribution of summer rainfall variability in Xinjiang

（$X_{p\cdot n}$），塔里木盆地夏季降水作为右场（$Y_{q\cdot n}$），进行奇异值分解研究两场之间所存在的时域相关性的空间联系。

其中，n为样本数；p、q为空间数；X和Y的交叉协方差矩阵为$S_{p\cdot q}$。存在L、R 2个酉矩阵，使$S_{p\cdot q}$可分解为：

$$S_{p\cdot q}=L\begin{bmatrix}\Lambda_m & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}R^{\mathrm{T}},\ m\leqslant \min(p,q) \quad (1)$$

$$U=L^{\mathrm{T}}X \quad (2)$$

$$V=R^{\mathrm{T}}Y \quad (3)$$

式中：L^{T}、R^{T}为L、R的转置矩阵；Λ_m为对角矩阵，称为奇异值，满足$\Lambda_1\geqslant\Lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\Lambda_m>0$。显著性检验通过蒙特卡罗方法验证。利用奇异值分解，由左、右场可分别构造U、V 2个时间系数矩阵，使得矩阵间有极大化协方差。

（2）多元线性回归分析：为了分析2个区域共同加热对塔里木盆地夏季降水的影响，选取塔里木盆地夏季降水作为响应变量Y，利用伊朗高原及北非地区夏季感热作为回归因子X_1、X_2，建立多元线性回归模型。

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_{p-1}X_{p-1}+\beta_pX_p+\varepsilon \quad (4)$$

其中：

$$Y=(y_1,y_2,\cdots,y_n)^{\mathrm{T}} \quad (5)$$

$$X=\begin{bmatrix}1 & \cdots & X_1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & X_p\end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\beta=(\beta_0,\beta_1,\cdots,\beta_P)^{\mathrm{T}} \quad (7)$$

式中：Y为预测量的历史观测向量；y_n为第n次的历史观测向量；X为回归因子的历史观测矩阵；X_p为搜集到的p个y的影响因素的n次观测值；β为系数向量；β_P为第p个系数向量；ε为随机误差项。

其中，系数向量（β）的最小二乘估计为：

$$\beta=(X^{\mathrm{T}}X)^{-1}X^{\mathrm{T}}Y \quad (8)$$

式中：X^{T}为X的转置矩阵。

然后，通过复相关系数R检验方程拟合误差，通过t检验对回归系数进行显著性检验。

（3）偏相关分析：为了探究伊朗高原和北非两个区域感热对塔里木盆地降水的单独影响，选取伊朗高原感热作为变量X，北非感热作为变量Z，塔里木盆地夏季降水作为变量Y进行偏相关分析。

$$r_{XY\cdot Z}=\frac{r_{XY}-r_{YZ}\times r_{XZ}}{\sqrt{(1-r_{YZ}^2)(1-r_{XZ}^2)}} \quad (9)$$

式中：$r_{XY\cdot Z}$为去除变量Z的线性影响后，X与Y之间的偏相关系数；r_{XY}为X和Y的相关系数；r_{XZ}为X和Z的相关系数；r_{YZ}为Y和Z的相关系数。通过统计量t进行显著性检验。

3 结果与分析

3.1 伊朗高原和北非地表感热与塔里木盆地夏季降水的关系

为了研究伊朗高原和北非地区感热异常与塔里木盆地夏季降水间的联系，分别选取伊朗高原（25°~40°N，50°~70°E）和北非地区（0°~35°N，0°~50°E）标准化地表感热作为左场，塔里木盆地夏季降水作为右场，进行奇异值分解分析，左场采用同性相关系数输出，右场则采用异性相关系数输出。由于伊朗高原与塔里木盆地降水第1模态的协方差贡献率达到39%，因此本文主要讨论第1模态。当伊朗高原感热整体呈正异常时（图2a），塔里木盆地降水分布也呈正异常分布（图2c），结合对应时间系数的相关系数0.70，说明伊朗高原感热增强对应塔里木盆地降雨整体增多，盆地西部尤为如此。夏季北非感热与塔里木盆地降水间关系与之类似（图2b、d），第1模态协方差贡献达41%，结合对应时间系数的相关系数0.68（图略），当北非感热呈"北弱南强"分布时，塔里木盆地降水一致偏多，增幅显著区域同样位于盆地西部。综上夏季伊朗高原和北非的感热异常均与塔里木盆地西部降水联系紧密，该区域也是近年来新疆夏季降水增加最为显著的区域[24]。

为了分析夏季2个地区感热加热对塔里木盆地降水的影响过程，根据图2，确定伊朗高原和北非关键区热力指数和塔里木盆地夏季降水指数。

伊朗高原热力指数（Iranian Plateau thermal index，IPTI）：

$$\mathrm{IPTI}=\mathrm{Nor}\left(H_{S_{\mathrm{IP}(27°\sim40°\mathrm{N},\ 57°\sim67°\mathrm{E})}}\right) \quad (10)$$

北非热力指数（North Africa thermal index，NATI）：

$$\mathrm{NATI}=\mathrm{Nor}\left(H_{S_{\mathrm{NA}(0°\sim15°\mathrm{N},\ 10°\sim40°\mathrm{E})}}-H_{S_{\mathrm{NA}(20°\sim30°\mathrm{N},\ 20°\sim45°\mathrm{E})}}\right) \quad (11)$$

式中：$H_{S_{\mathrm{IP}}}$和$H_{S_{\mathrm{NA}}}$分别为1971—2019年49 a的夏季伊朗高原和北非关键区平均地表感热距平；Nor为对变量标准化处理。

夏季降水指数（Summer precipitation index,

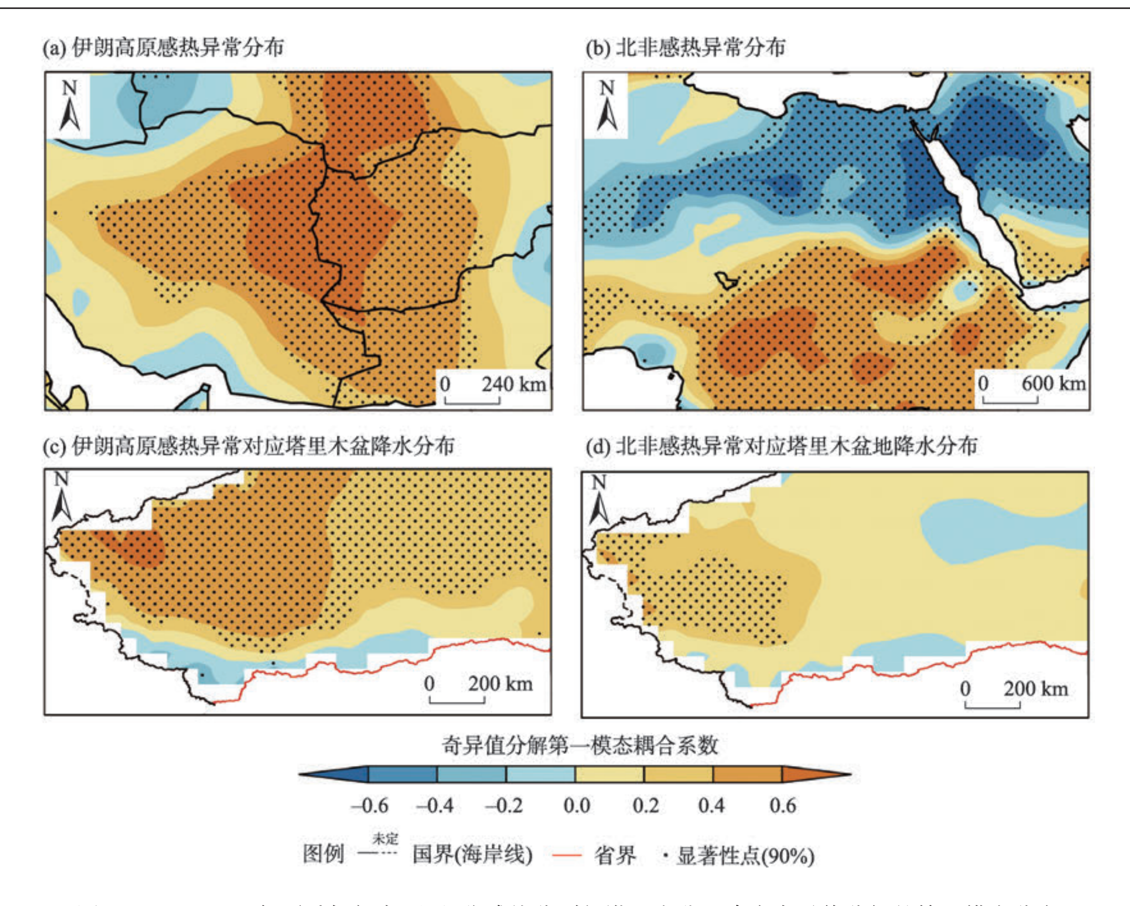


图2 1971—2019年夏季伊朗高原、北非感热分别与塔里木盆地降水奇异值分解的第一模态分布

Fig. 2 First mode in the singular value decomposition expansion for the correlations between sensible heat flux over the Iranian Plateau, sensible heat flux over the North Africa & summer rainfall in the Tarim Basin from 1971 to 2019

SPI)：定义49 a的夏季区域(36°~42°N, 73.5°~84°E)平均降水量的标准化序列为塔里木盆地夏季降水指数。

通过奇异值分解分析发现伊朗高原和北非地表感热异常均与塔里木盆地夏季降水联系紧密，那么2个区域共同加热对塔里木盆地降水有何影响呢？利用多元线性回归的方法，以IPTI与NATI作为影响因子拟合出伊朗高原-北非热力指数(Iranian Plateau & North Africa thermal index，IPNATI)：

$$\mathrm{IPNATI}=0.56X_1+0.20X_2-2.41\times10^{-9} \quad (12)$$

式中：X_1、X_2分别为伊朗高原热力指数与北非热力指数。定义当IPNATI>0.5时，为伊朗高原-北非加热强年，分别为1981、2001、2002、2003、2004、2005、2011、2016、2017年和2018年，共10 a；当IPNATI<−0.5时，为伊朗高原-北非加热弱年，分别为1975、1976、1979、1980、1983、1984、1995、1997年和2009年，共9 a。

图3分别给出了3个热力指数与塔里木盆地夏季降水指数的时间序列。伊朗高原-北非热力指数与塔里木盆地夏季降水指数的相关系数为0.64，伊朗高原热力指数与塔里木盆地夏季降水指数的相关系数为0.58，北非热力指数与塔里木盆地夏季降水指数的相关系数为0.33，均通过了95%的信度检验；因此3个热力指数均与降水指数关系密切，但2个区域共同加热与塔里木盆地夏季降水之间的联系要比仅考虑一个地区下垫面加热时更为紧密。

3.2 夏季伊朗高原和北非热力异常对塔里木盆地夏季降水的单独影响

图4a给出了去除北非感热加热影响后，伊朗高原热力指数与塔里木盆地夏季降水的偏相关分布。由图可见，伊朗高原热力指数与塔里木盆地降水呈显著的正相关关系，当伊朗高原夏季感热偏强时，对应同期塔里木盆地降水整体增多，其西部区域增加尤为显著。在去除伊朗高原热力影响，仅考虑北非感热影响(图4b)的情况下，当北非热力指数偏强时，塔里木盆地夏季降水整体呈正相关分布，即当北非北部感热偏弱、南部偏强时，塔里木盆地夏季整体降水偏多，显著区域略小于图4a。

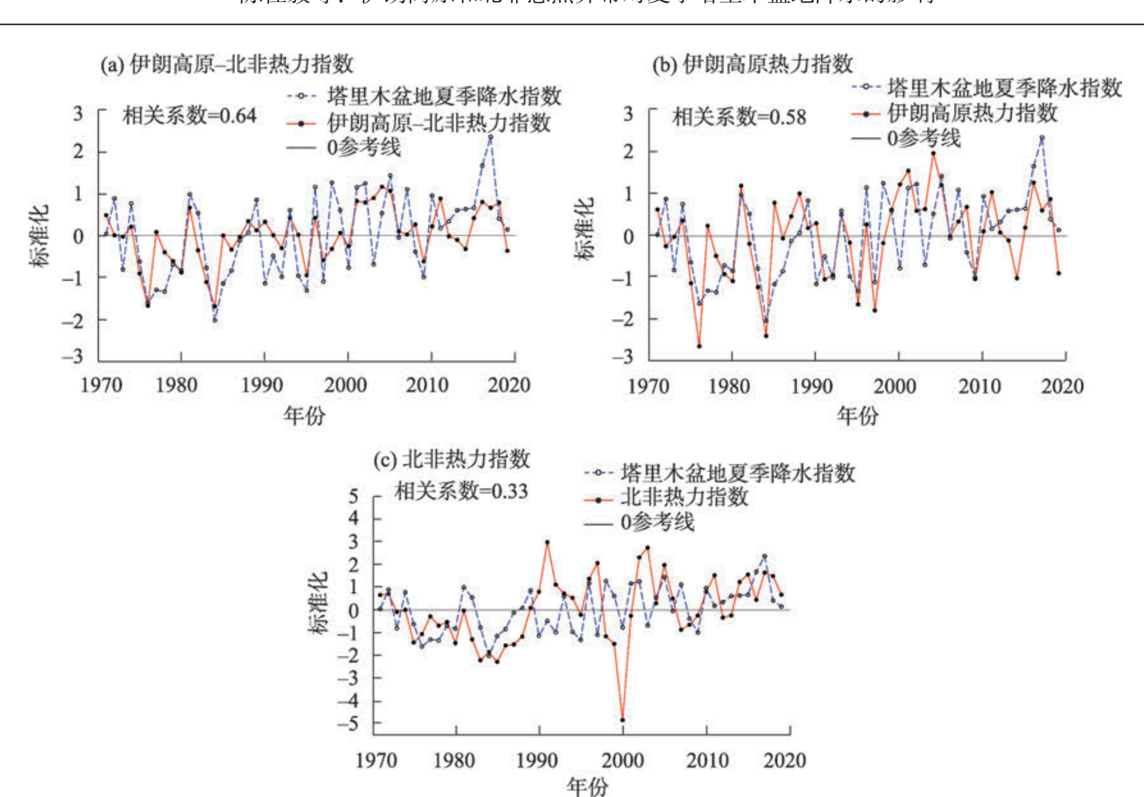


图3 1971—2019年夏季3个热力指数与塔里木盆地降水指数的时间序列

Fig. 3 Time series of three thermal indices and Tarim Basin precipitation index from 1971 to 2019

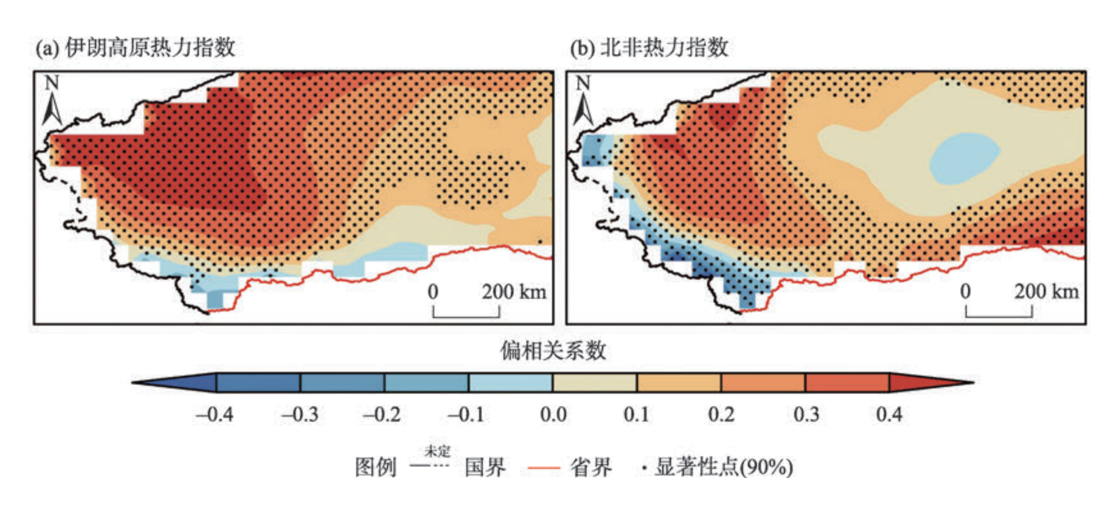


图4 伊朗高原热力指数和北非热力指数与塔里木盆地夏季降水的偏相关

Fig. 4 Partial correlation of the Iranian Plateau thermal index and North Africa thermal index with summer precipitation in the Tarim Basin

在伊朗高原感热异常单独影响下(图5a)，高原热力指数与中亚500 hPa风场联系密切，中亚与蒙古上空分别受气旋与反气旋环流控制，塔里木盆地处在2个环流系统之间东南风加强，形成盆地降水偏多的环流形势；当去除伊朗高原加热影响后，北非热力效应对500 hPa环流的影响(图5b)与图5a类似，在伊朗高原上空存在反气旋环流与中亚气旋配合加强了西风输送，另一方面，蒙古反气旋北移至贝加尔湖附近同样配合中亚气旋，形成有利于塔里木盆地降水增加的环流背景。

通过伊朗高原热力指数与水汽输送的偏相关分布(图6a)分析可知，在去除北非加热影响后，仅在伊朗高原感热异常影响下，阿拉伯海异常反气旋性环流配合中亚气旋性环流，通过两步输送的方式，

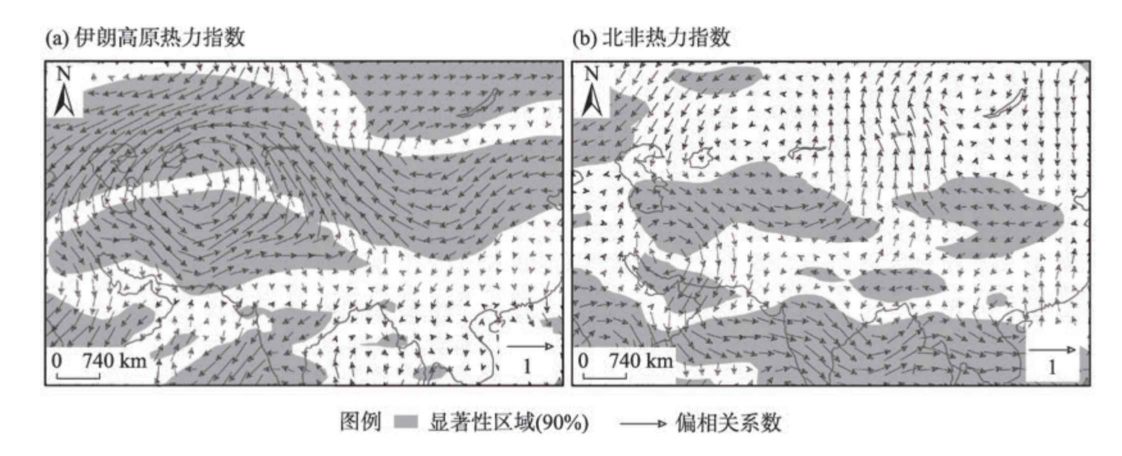
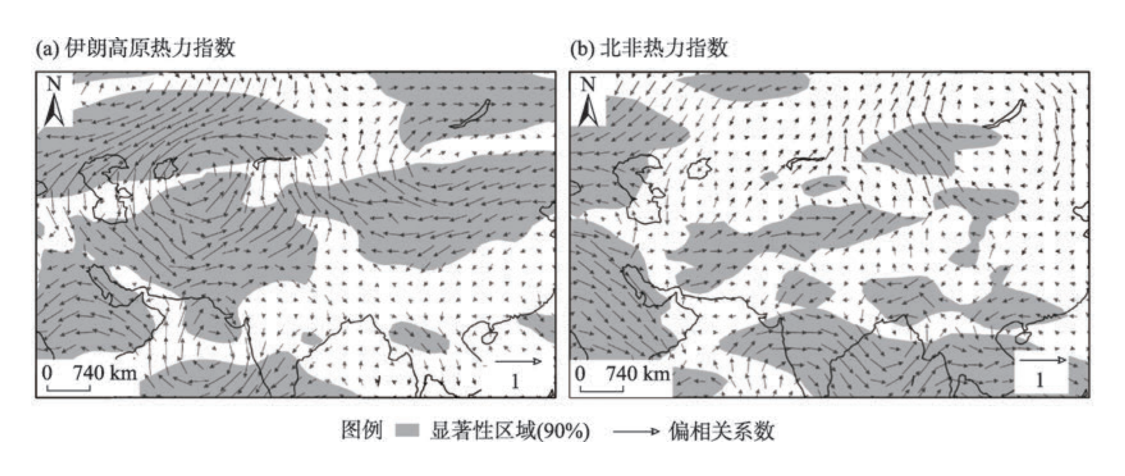


图5 伊朗高原热力指数和北非热力指数与500 hPa风的偏相关

Fig. 5 Partial correlation of the Iranian Plateau thermal index and North Africa thermal index with 500 hPa wind



注:水汽通量由地表积分至300 hPa。

图6 伊朗高原热力指数和北非热力指数与水汽通量的偏相关

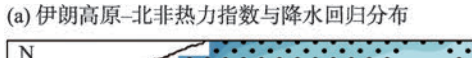
Fig. 6 Partial correlation of the Iranian Plateau thermal index and North Africa thermal index with water vapor flux

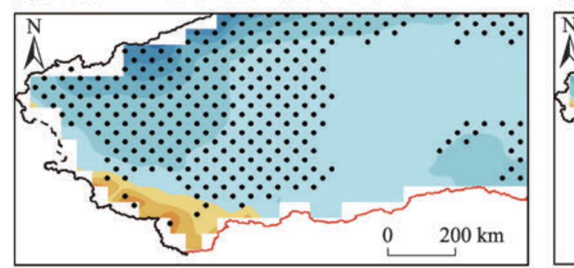
将阿拉伯海水汽向北输送至塔里木盆地上空[39]。仅考虑北非加热的影响(图6b),不能形成阿拉伯海上空水汽向北的两步输送,虽然中亚高层气旋环流依旧存在,即两步输送的第二步形成,但是阿拉伯海-印度半岛的反气旋环流位置偏南,因此热带印度洋水汽无法北上进入塔里木盆地。这也解释了图3b和图3c,为何北非加热指数与塔里木盆地夏季降水指数的相关性略弱一些。

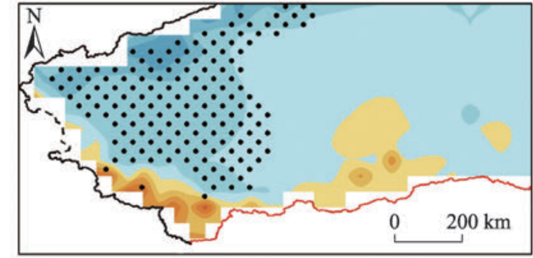
3.3 夏季伊朗高原和北非热力异常对塔里木盆地夏季降水的共同影响

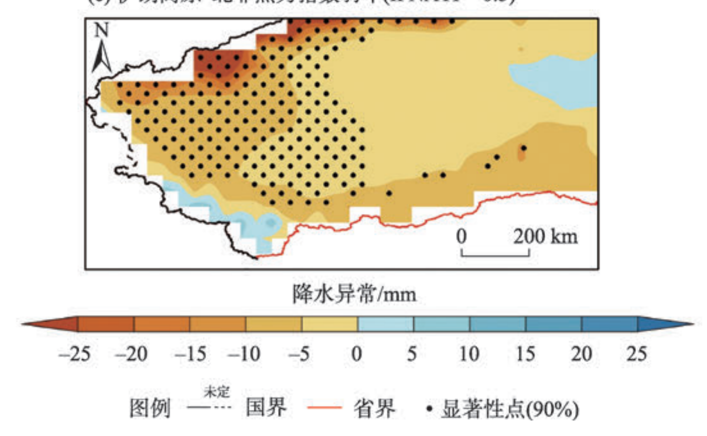
利用伊朗高原-北非热力指数分析北非和伊朗高原共同加热对塔里木盆地降水的影响过程,以伊朗高原-北非热力指数为自变量,塔里木盆地夏季降水为应变量建立回归模型,给出了回归分布(图7a),二者呈显著的正相关关系,在伊朗高原和北非地区共同加热的影响下,塔里木盆地夏季降水整体偏多。合成分析也证实了这一点,当伊朗高原-北非加热偏强时(图7b),对应夏季塔里木盆地降雨一致增多;当伊朗高原-北非加热偏弱时(图7c),塔里木盆地降水则表现出与强年相反的分布特征,降雨一致偏少。

降水是大气环流和水汽输送配合的结果,已有研究表明新疆夏季降水与同期中亚西风急流位置的南北移动密切联系[39-40]。从伊朗高原-北非热力指数与200 hPa纬向风的回归分布(图8a)可以看出,伊朗高原-北非热力指数中亚200 hPa纬向风联系紧密,当伊朗高原-北非加热偏强时(图8b),200 hPa纬向风场呈“北负南正”的异常空间分布,中亚副热带西风急流南侧西风增强,北侧减弱,急流轴偏南对应塔里木盆地降水偏多;当伊朗高原-北非









注：IPNATI为伊朗高原-北非热力指数。下同。

图7 塔里木盆地夏季降水异常分布

Fig. 7 Abnormal distribution of summer precipitation in the Tarim Basin

加热偏弱时（图8c），中亚200 hPa纬向风场则表现出与强年相反的分布特征，呈“北正南负”分布，急流轴向北偏移，塔里木盆地降水偏少[39-40]。

图9a给出了伊朗高原-北非热力指数与500 hPa环流的回归分布，2个区域共同加热与中亚500 hPa风场联系紧密。合成分析发现，在伊朗高原-北非加热强年（图9b），在中亚气旋性环流与蒙古高原反气旋性环流共同作用下，塔里木盆地上空偏南风增强，易于低纬度暖湿空气北上，为塔里木盆地降水的发生提供有利环流形势。在伊朗高原-北非加热弱年（图9c），500 hPa风场分布则与图9b基本相反，中亚与蒙古高原对流层中层分别为异常反气旋性环流与气旋性环流，加强了塔里木盆地上空的偏北风，引导干冷空气南下，塔里木盆地降水偏少。

塔里木盆地降水的生成不仅需要有利环流动力条件，还需要水汽输送共同作用。由伊朗高原-北非热力指数与水汽通量的回归分布可以发现（图10a），2个区域共同加热主要影响着阿拉伯海上空的水汽向北输送。在伊朗高原-北非加热强年（图10b），阿拉伯海水汽由其上空的异常反气旋运送至中纬度（30°N附近），接着在中亚异常气旋环流作用下，水汽继续北上进入塔里木盆地。此外，我国北方存在一反气旋环流，其底部的偏东气流可以将东部的水汽沿河西走廊向西输送，但由于东亚夏季风偏弱，不利于低纬太平洋水汽向北传输，因此塔里木盆地水汽的主要源地为印度洋[41]。在伊朗高原-北非加热弱年（图10c），水汽输送则表现出与强年基本相反的空间分布，热带印度洋与中亚受异常气旋与反气旋环流控制，二者均不利于水汽向北输送。

4 讨 论

夏季北非和伊朗高原感热异常均可单独影响同期塔里木盆地降水，那么2个区域感热强迫通过什么机制影响塔里木盆地降水呢？已有研究表明伊朗高原与北非感热异常均能够激发纬向异常环流波列，沿西风带向东传播，影响下游天气气候[14,17]。200 hPa风场在伊朗高原-北非共同加热的影响下（图11a），中纬对流层高层自西向东呈“+ - +”的波列分布，对应中亚上空为气旋性环流，受此影响，塔

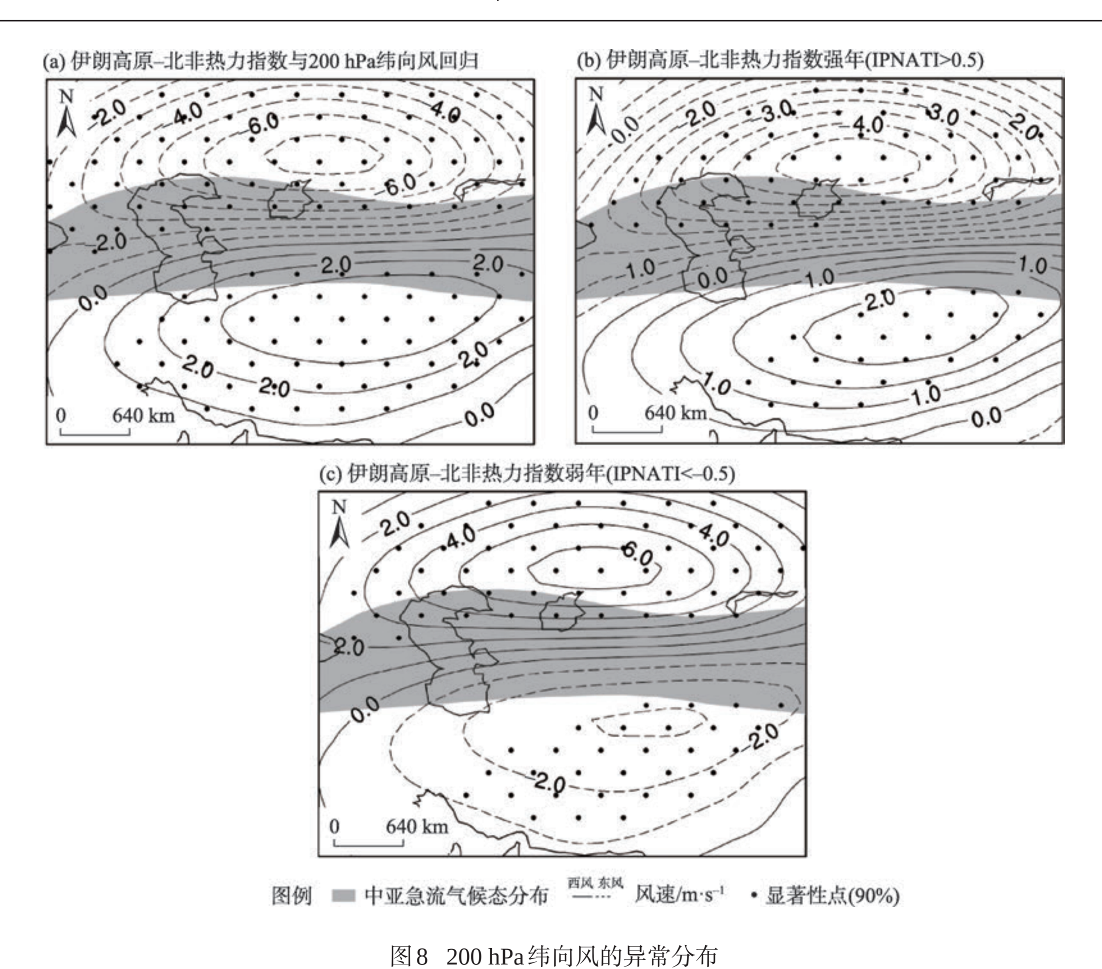
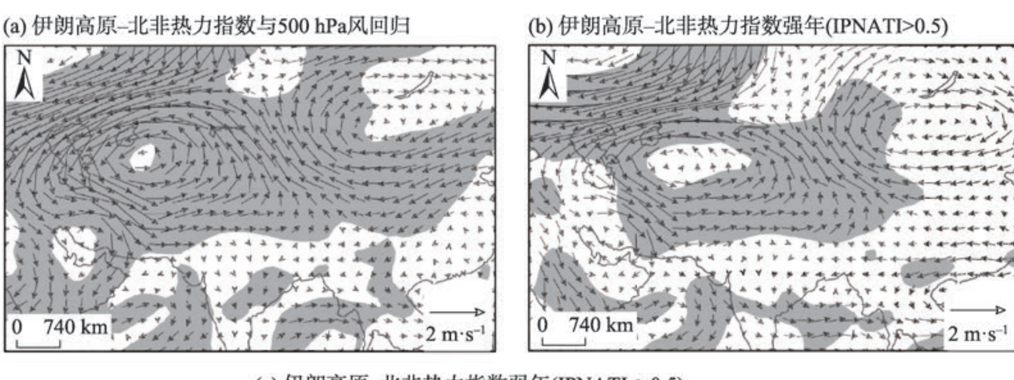


图8 200 hPa纬向风的异常分布

Fig. 8 Abnormal distribution of zonal wind at 200 hPa



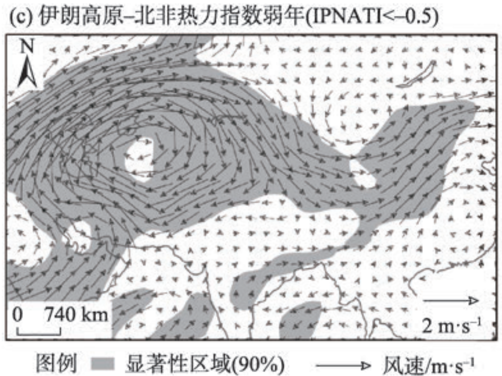


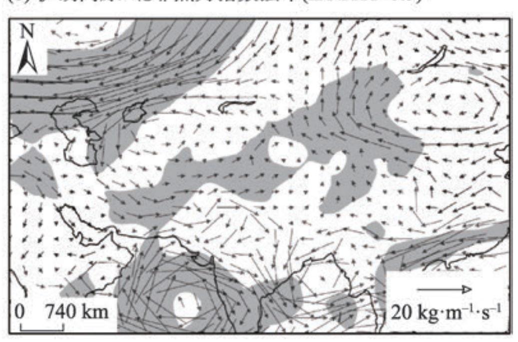
图9 500 hPa风的异常分布

Fig. 9 Abnormal distribution of 500 hPa wind

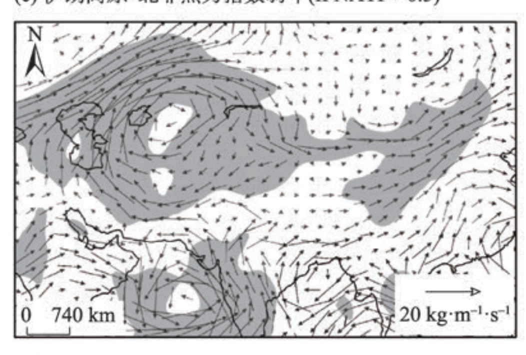
(a) 伊朗高原–北非热力指数与水汽通量回归

N
0 740 km
20 kg·m^{-1}·s^{-1}

(b) 伊朗高原–北非热力指数强年(IPNATI>0.5)



(c) 伊朗高原–北非热力指数弱年(IPNATI<–0.5)



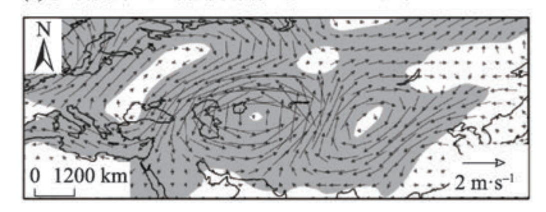
图例 ■ 显著性区域(90%) ⟶ 水汽通量/kg·m^{-1}·s^{-1}

注：水汽通量由地表积分至300 hPa。

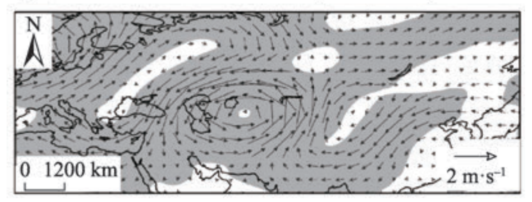
图10 水汽输送的异常分布

Fig. 10 Abnormal distribution of water vapor transport

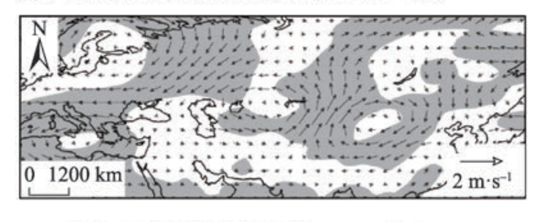
(a) 伊朗高原–北非热力指数与200 hPa风回归



(b) 伊朗高原–北非热力指数强年(IPNATI>0.5)



(c) 伊朗高原–北非热力指数弱年(IPNATI<–0.5)



图例 ■ 显著性区域(90%) ⟶ 风速/m·s^{-1}

图11 3个热力指数与夏季200 hPa风场回归分布

Fig. 11 Regression of 200 hPa wind against the three thermal indices

里木盆地上空南风增强。伊朗高原热力指数与200 hPa风场回归分布类似于图11a(图11b)，也是可以在中纬度对流层高层激发出纬向波列。北非热力指数与200 hPa风场回归分布(图11c)与图11a略有差异，由于是一个热力差异指数，因此可以在北非及其北部上空分别形成一个异常气旋和反气旋环流，与已有研究类似[21]；北部的反气旋环流向东传播，也形成“+ – +”的波列，中亚上空同样对应异常气旋环流，形成有利于塔里木盆地降水增加的环流背景。

本文分析了伊朗高原和北非感热加热对塔里木盆地夏季降水的影响，揭示了可能的影响机制，但还存在以下不足：(1) 研究主要聚焦于2个区域加热与塔里木盆地夏季降水关系的年际尺度，没有考虑年代际影响。而从图3可见，在1999—2005年，伊朗高原感热与塔里木盆地降水表现出反信号变化，在1990—2000年北非感热与塔里木盆地降水表现出反信号变化，这是否是由于二者感热年代际的变化引起？通过9 a滑动平均(图略)，发现伊朗高原感热在1998年出现了年代际转折，北非感热的年代际转折则是在1990年，2个区域感热均由弱转强，2个区域在感热偏弱(1990、1998年前)与偏强(1990、1998年后)不同年代际的背景下，是否具有一致的热力效应，对塔里木盆地夏季降水的影响是否存在差异，需要进一步研究。(2) 已有研究指出青藏高原热力效应与北非热力变化联系密切[18]，伊朗高原和青藏高原的表面热力效应与印度洋水汽输送之间存在一个相互影响的耦合系统[42-43]，同时青藏高原潜热变化也显著影响着塔里木盆地旱涝分布[44]，那么在伊朗高原与北非感热加热对塔里木盆地降水的影响过程中青藏高原热力效应贡献如何，也需要未来借助数值试验进一步分析。

5 结 论

近50 a来在新疆气候转型的过程中，夏季降水呈增加趋势，其中伊犁河谷、天山以及塔里木盆地3个地区降水增加显著。什么原因导致了塔里木盆地夏季降水的显著增加呢？本文从区域协同的角度，分析了伊朗高原与北非地区感热加热对塔里木盆地夏季降水影响的主要物理过程。主要结论如下：

(1) 奇异值分解分析结果表明，夏季2个区域地表感热异常均与塔里木盆地降水联系密切。相关分析发现考虑2个区域共同加热与塔里木盆地夏季降水的联系要比仅考虑单一区域加热时更为紧密。

(2) 当伊朗高原感热异常偏强(弱)，同时北非感热呈北弱南强(北强南弱)异常分布时，中亚200 hPa副热带西风急流位置偏南(偏北)，中亚和蒙古高原上空分别受异常气旋(反气旋)和反气旋(气旋)控制，塔里木盆地受2个系统共同影响，偏南(北)风加强，形成有利(不利)的环流条件；同时阿拉伯海水汽可以(不能)由其上空的异常反气旋(气旋)环流向北输送至中纬度地区，在中亚上空的异常气旋(反气旋)环流的配合下，可以(不能)接力将中纬度的水汽向塔里木盆地输送，造成塔里木盆地降水偏多(少)。

(3) 伊朗高原和北非感热加热均可单独影响塔里木盆地夏季降水，但存在差异。在仅考虑伊朗高原感热单独偏强时，环流形势与水汽输送均利于塔里木盆地降水发生；而只考虑北非感热加热偏强时，仅能形成塔里木盆地降水发生的大尺度环流条件。因此，在2个区域加热共同影响塔里木盆地夏季降水的过程中，伊朗高原感热加热起主导作用，在北非感热加热的配合下，共同影响中亚环流与水汽输送，进而调制夏季塔里木盆地的旱涝分布。

参考文献(References)

[1] 段安民, 刘屹岷, 吴国雄. 4—6月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常[J]. 中国科学(地球科学), 2003, 33(10): 997-1004. [Duan Anmin, Liu Yimin, Wu Guoxiong. Thermal state of Tibetan Plateau in April to June and association with East Asian summer precipitation and atmospheric circulation anomalies[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2003, 33(10): 997-1004.]

[2] 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 528-540. [Wu Guoxiong, Mao Jiangyu, Duan Anmin, et al. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(5): 528-540.]

[3] 赵平, 陈隆勋. 35年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系[J]. 中国科学(地球科学), 2001, 31(4): 327-332. [Zhao Ping, Chen Longxun. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2001, 31(4): 327-332.]

[4] Huang R H, Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1989, 6: 21-32.

[5] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 465-476. [Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in north China[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 465-476.]

[6] 李启芬, 吴哲红, 王兴菊, 等. 1981年以来中国夏季降水变化特征及其与SST和前期环流的联系[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 58-67. [Li Qifen, Wu Zhehong, Wang Xingju, et al. The characteristics of summer precipitation in China since 1981 and its relationship with SST and pre-circulation[J]. Plateau Meteorology, 2020,

39(1): 58-67.]

[7] 杨建玲, 胡海波, 穆建华, 等. 印度洋海盆模影响西北东部5月降水的数值模拟研究[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 510-516. [Yang Jianling, Hu Haibo, Mu Jianhua, et al. Study of numerical model stimulation of the tropical Indian Ocean basin mode impacts on May precipitation anomaly in east of northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(2): 510-516.]

[8] Zhou Y, Huang A N, Zhao Y, et al. Influence of the sea surface temperature anomaly over the Indian Ocean in March on the summer rainfall in Xinjiang[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(3-4): 781-789.

[9] 罗会邦, 陈蓉. 夏半年青藏高原东部大气热源异常对环流和降水的影响[J]. 气象科学, 1995, 15(4): 94-102. [Luo Huibang, Chen Rong. The impact of the anomalous heat sources over the eastern Tibetan Plateau on the circulation over East Asia in summer half year[J]. Scientia Meteorologica Sicica, 1995, 15(4): 94-102.]

[10] 李栋梁, 柳苗, 王慧. 高原东部凝结潜热及其对北半球500 hPa高度场和我国汛期降水的影响[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 713-718. [Li Dongliang, Liu Miao, Wang Hui. Latent heat series over the east part of QXP in rainy season and its impact on 500 hPa height fields of northern hemisphere and precipitation in China flood season[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(4): 713-718.]

[11] Watanabe T. Role of regional thermal contrast over West Asia in interannual variation in atmospheric moisture transportation over the Indian Ocean and neighboring areas at summer monsoon onset [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2015, 120(23): 11826-11845.

[12] Wu G X, Zhuo H F, Wang Z Q, et al. Two types of summertime heating over the Asian large-scale orography and excitation of potential vorticity forcing I. over Tibetan Plateau[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(10): 1996-2008.

[13] Zhang Y N, Wu G X, Liu Y M, et al. The effects of asymmetric potential vorticity forcing on the instability of South Asia High and Indian summer monsoon onset[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(2): 337-350.

[14] 杨莲梅, 张庆云. 夏季沿西亚急流Rossby波活动异常的波源和能量传播及转换特征[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 555-565. [Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Wave sources, energy propagation and conversion for anomalous Rossby wave activities along West Asian jet stream[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(4): 555-565.]

[15] 王秀荣, 徐祥德, 王维国. 西北地区春、夏季降水的水汽输送特征[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 749-758. [Wang Xiurong, Xu Xiangde, Wang Weiguo. Characteristic of spatial transportation of water vapor for northwest China's rainfall in spring and summer[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 749-758.]

[16] Zhang Q, Wu G, Qian Y. The bimodality of the 100 hPa South Asia High and its relationship to the climate anomaly over East Asia in summer[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2002, 80(4): 733-744.

[17] 李超, 魏建苏, 孙泓川, 等. 北非感热年际变化与中国东部降水的遥相关[J]. 气象科学, 2012, 32(4): 443-450. [Li Chao, Wei Jiansu, Sun Hongchuan, et al. Correlation analysis between the decadal character of sensible heat in north Africa and rainfall in east China[J]. Scientia Meteorologica Sicica, 2012, 32(4): 443-450.]

[18] 梁姗姗, 钱永甫. 亚非感热异常时空特征及其与我国降水异常的关系[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 620-626. [Liang Shanshan, Qian Yongfu. Sensible heat oscillation character of Asian and African continents and its relation to precipitation anomaly of eastern China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29(5): 620-626.]

[19] 宁亮, 钱永甫. 北非和青藏高原感热振荡特征及与我国东部夏季降水的关系[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 357-365. [Ning Liang, Qian Yongfu. Oscillation characteristics of sensible heat in north Africa and Qinghai-Xizang Plateau and their impacts on the rainfall in east China[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(3): 357-365.]

[20] 何冬燕, 吴蓉, 田红, 等. 1971年以来安徽省秋季连阴雨特征及成因分析[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 829-844. [He Dongyan, Wu Rong, Tian Hong, et al. Analysis on the feature and formation mechanism of the continuous rain in autumn in Anhui since 1971 [J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(4): 829-844.]

[21] 赵勇, 钱永甫. 北非地区海-陆热力差异与夏季江淮流域旱涝的关系[J]. 气象学报, 2008, 66(2): 203-212. [Zhao Yong, Qian Yongfu. Relationships between the anomalies of sea-land thermal contrast in the northern Africa areas and the flood and drought in the Changjiang and Huaihe River areas in summer[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(2): 203-212.]

[22] Li Y, Huang J, Ji M, et al. Dryland expansion in northern China from 1948 to 2008[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(6): 870-876.

[23] Huang J P, Ma J R, Guan X D, et al. Progress in semi-arid climate change studies in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36: 922-937.

[24] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响[J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 194-200. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. A study on signals and effects of climatic pattern changes from warm-dry to warm-wet in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(3): 194-200.]

[25] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.]

[26] 张家宝, 邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 255-263. [Zhang Jiabao, Deng Zifeng. Introduction to Xinjiang precipitation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987: 255-

263.]
[27] Zhu K W, Guan X D, Huang J P, et al. Precipitation over semi-arid regions of North Hemisphere affected by Atlantic multidecadal oscillation[J]. Atmospheric Research, 2021, 262: 105801, doi: 10. 1016/j.atmosres.2021.105801.
[28] 赵勇, 黄安宁, 杨青, 等. 青藏和伊朗高原热力异常与北疆夏季降水的关系[J]. 气象学报, 2013, 71(4): 660-667. [Zhao Yong, Huang Anning, Yang Qing, et al. Relationships between the anomalies of surface sensible heat in the Tibetan Plateau and Iran Plateau and summertime precipitation in north Xinjiang[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(4): 660-667.]
[29] 陈佳毅, 赵勇. 伊朗高原和青藏高原夏季加热对塔里木盆地降水的影响[J/OL]. 高原气象. [2022-06-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.P.20220520.1052.002.html. [Chen Jiayi, Zhao Yong. Effects of the summer heating over the Iranian Plateau and the Tibetan Plateau on precipitation over the Tarim Basin[J/OL]. Plateau Meteorology. [2022-06-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.P.20220520.1052.002.html.]
[30] 卢星, 赵勇. 北非副热带高压与中亚夏季降水的关系[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1050-1060. [Lu Xing, Zhao Yong. The relationships between north Africa subtropical high and summer precipitation over Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1050-1060.]
[31] 杨青, 魏文寿, 李军. 塔克拉玛干沙漠及周边地区大气水汽量的时空变化[J]. 科学通报, 2008, 53(增刊2): 64-70. [Yang Qing, Wei Wenshou, Li Jun. Temporal and spatial variations of atmospheric water vapor in the Taklimakan Desert and surrounding areas[J]. Bulletin of Science, 2008, 53(Suppl. 2): 64-70.]
[32] Xie S P, Yu K, Yan D U, et al. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in Post-ENSO summer: A review[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(4): 411-432.
[33] 刘超, 刘屹岷, 刘伯奇. 6种地表热通量资料在伊朗-青藏高原地区的对比分析[J]. 气象科学, 2015, 35(4): 398-404. [Liu Chao, Liu Yimin, Liu Boqi. Comparison of six sensible heat flux datasets over the Iranian-Tibetan P1ateaus[J]. Scientia Meteorologica Sicica, 2015, 35(4): 398-404.]
[34] Yang Y X, Liu Y M, Li M S, et al. Assessment of reanalysis flux products based on eddy covariance observations over the Tibetan Plateau[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(1/2): 275-292.
[35] Kobayashi C, Iwasaki T. Brewer-Dobson circulation diagnosed from JRA-55[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2016, 121(4): 1493-1510.
[36] 赵煜飞, 朱江, 许艳. 近50 a中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 414-420. [Zhao Yufei, Zhu Jiang, Xu Yan. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(4): 414-420.]
[37] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 160-169. [Wei Fengying. Statistical diagnosis and prediction techniques of modern climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 160-169.]
[38] 林彬. 多元线性回归分析及其应用[J]. 中国科技信息, 2010(9): 60-61. [Lin Bin. Multiple linear regression analysis and its application[J]. China Science and Technology Information, 2010(9): 60-61.]
[39] Zhao Y, Wang M Z, Huang A N, et al. Relationships between the West Asian subtropical westerly jet and summer precipitation in northern Xinjiang[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116: 403-411.
[40] 杨莲梅, 张庆云. 新疆夏季降水年际变化与亚洲副热带西风急流[J]. 应用气象学报, 2008, 19(2): 171-179. [Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Interannual variation of summer precipitation in Xinjiang and Asian subtropical westerly jet stream[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(2): 171-179.]
[41] Huang W, Feng S, Chen J, et al. Physical mechanisms of summer precipitation variations in the Tarim Basin in northwestern China [J]. Journal of Climate, 2015, 28(9): 3579-3591.
[42] Wu G X, Liu Y M, He B, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 404, doi: 10.1038/srep00404.
[43] 刘屹岷, 王子谦, 卓海峰, 等. 夏季亚洲大地形双加热及近对流层顶位涡强迫的激发Ⅱ: 伊朗高原-青藏高原感热加热[J]. 中国科学(地球科学), 2017, 47(3): 354-366. [Liu Yimin, Wang Ziqian, Zhuo Haifeng, et al. Two types of summertime heating over Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing II. Sensible heating over Tibetan-Iranian Plateau[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(3): 354-366.]
[44] 王天竺, 赵勇. 青藏高原和热带印度洋5月热力异常与新疆夏季降水的关系[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 1-14. [Wang Tianzhu, Zhao Yong. Relationships between thermal anomalies over the Qinghai-Xizang Plateau and Tropical Indian Ocean in May with summer rainfall in Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(1): 1-14.]

Effects of sensible heat anomalies in the Iranian Plateau and North Africa on summer precipitation in the Tarim Basin

CHEN Jiayi, ZHAO Yong

(Plateau Atmosphere & Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China)

Abstract: Based on the JRA−55 surface sensible heat (SH) flux, Japan Meteorological Agency provided the reanalysis circulation data, and the National Meteorological Information Centre of China Meteorological Administration provided monthly grid precipitation data from 1971 to 2019. Therefore, the effects of SH anomalies over the Iranian Plateau and North Africa on precipitation in the Tarim Basin during summer were investigated. The results show that (1) the SH anomalies over both areas were closely associated with summer precipitation in the Tarim Basin, and the combined heating in the two regions was better associated with summer precipitation in the Tarim Basin than the heating in single one of the two regions. (2) When the SH strengthened in the Iranian Plateau, although strengthened and weakened in the southern and northern North Africa, respectively, it corresponded to the subtropical westerly jet in Central Asia shifting south, which caused an anomalous south wind to prevail in the Tarim Basin. Concurrently, an anomalous anticyclone over the Arabian Sea and that in Central Asia transported water vapor from the Arabian Sea to the Tarim Basin. Consequently, the abovementioned conditions contributed to more rainfall in the Tarim Basin during the same period. (3) Single thermal anomalies over the Iranian Plateau and North Africa can affect the summer precipitation in the Tarim Basin. Additionally, the SH over the Iranian Plateau can significantly influence the large-scale circulation and water vapor transport, indicating its closer relationship with precipitation. In contrast, SH anomalies in North Africa primarily affected the large-scale circulation, the impact on water vapor transport differed from that of the Iranian Plateau, and the more southerly positioning of the anomalous anticyclone over the Indian Peninsula, resulting in the inability to transport Arabian Sea water vapor into the Tarim Basin through the two-step processes.

Key words: sensible heat anomaly; combined heating; North Africa; Iranian Plateau; summer precipitation in the Tarim Basin